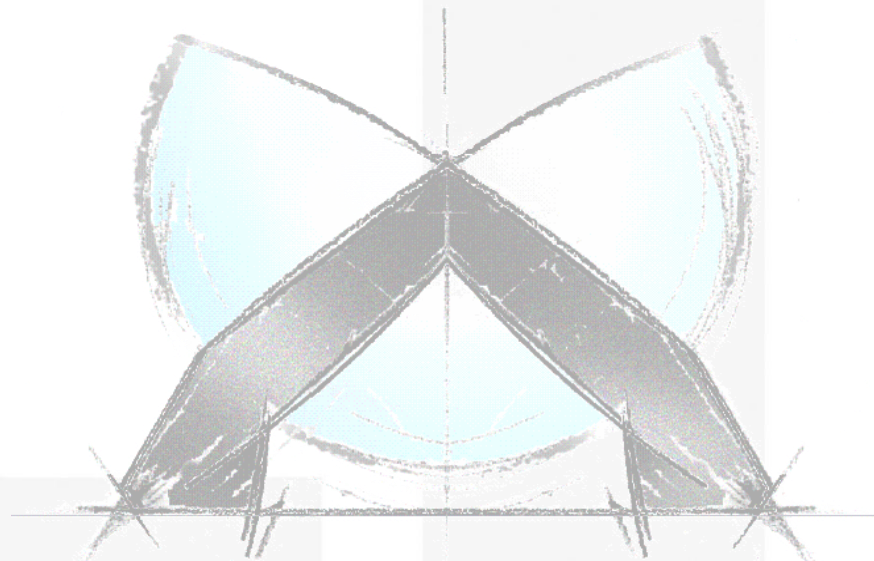


Dynamisches Materialverhalten von Kunststoffen und Composites

A. Fertschej, P. Reithofer (4a engineering GmbH)

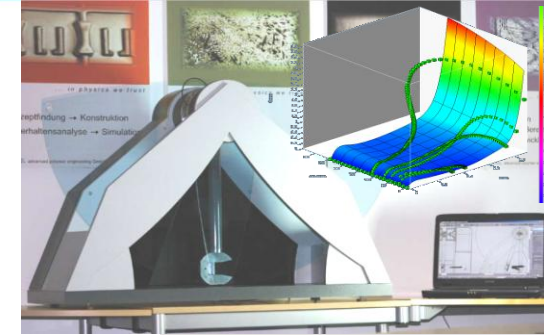


Deutsche SIMULIA Konferenz 2014
Dresden



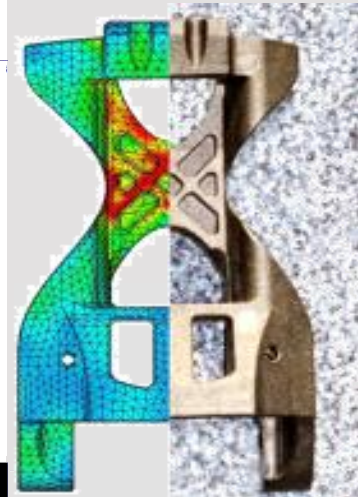
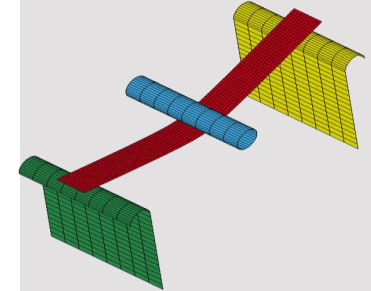
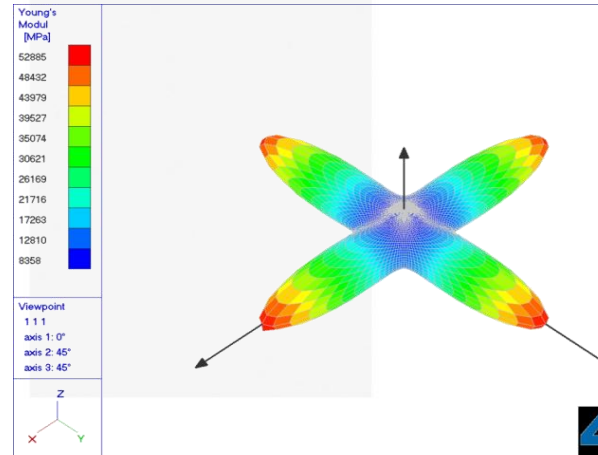
4a engineering GmbH
Industriepark 1
A-8772 Traboch
reithofer@4a.co.at
++43 (0) 664 80106 601

© 4a engineering GmbH, all rights reserved



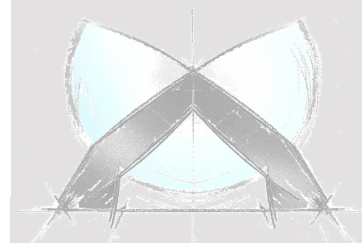
.. in physics we trust

- Gründungsjahr 2002
- F&E - Dienstleistung
- 15 bis 20 Kernkunden
- bisher mehr als 500 Projekte
 - 45% Automotive
 - 15% Luft- und Raumfahrt
 - 15% Maschinenbau
 - 10% Medizintechnik
 - 15% Consumer goods
- Kernkompetenzen
 - Kunststoff- und Werkstoffwissenschaften
 - Numerische Simulationsmethoden
 - Leichtbau und Faserverbundwerkstoffe
 - Methodenentwicklungskompetenz



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

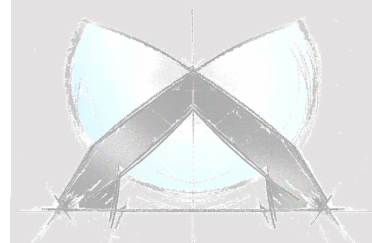
- Einleitung
- 4a impetus
- Materialmodelle für Thermoplaste
 - Materialverhalten von Kunststoffen
 - Notwendigkeit unterschiedlicher Komplexität der Materialmodelle
 - einfache Materialmodelle – von Mises Fließfläche
 - komplexe Materialmodelle – allg. Fließfläche – Abq_molded_plastic
- Materialmodelle für Composites
 - Kopplung Mikromechanik
 - *ABQ_PLY_FABRIC
- Zusammenfassung



- Forderungen der Industrie
 - Materialkarten für eine Vielzahl an
 - Materialien (verstärkte und unverstärkte Thermoplaste, Schäume, Composites, Metalle, Holz, ...) und
 - Solver (Abaqus, LS Dyna, Pam Crash, ...)
 - Abbildung einer realitätsnahen Belastung
 - schnelle und günstige Erstellung
 - Validierung

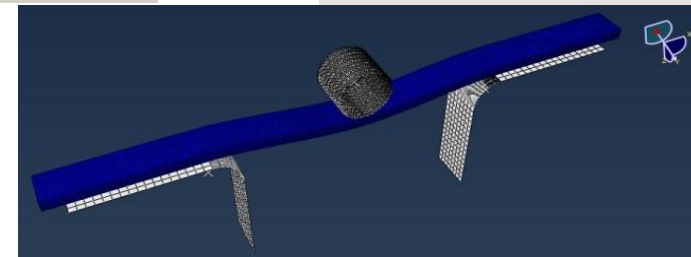
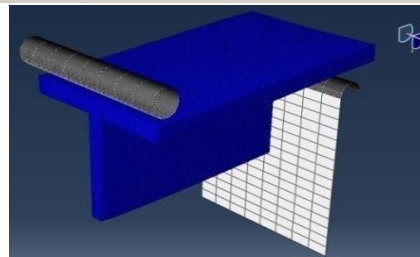
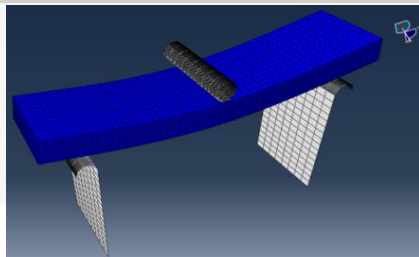
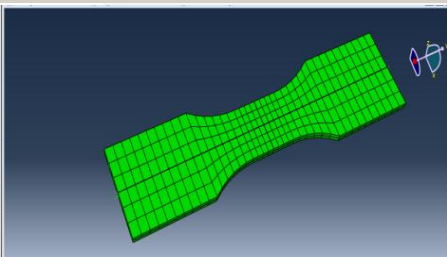
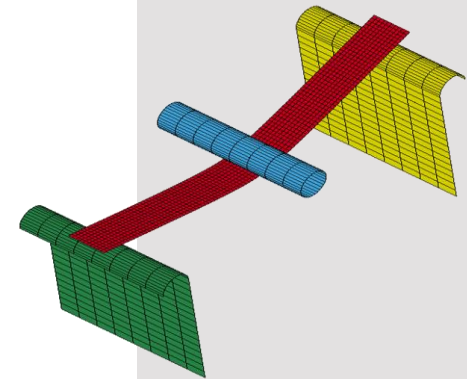
→ Entwicklung von 4a impetus

Komplettsystem vom Test zur validierten Materialkarte



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Geschlossenes System vom Versuch bis zur validierten Materialkarte



4a impetus

Vorgehensweise

Versuchsdatenbank

- Geometrie
- Belastung
- Randbedingungen
- Orientierung
- Prüfergebnisse
Kraft/Weg
Spannung/Dehnung
...

Modelldatenbank

- Optimierung/Validierung
- Solver
Abaqus, LS Dyna, ...
- Materialmodell
von Mises
allg. Fließfläche
Dehnratenabhängigkeit
- Idealisierung
Shell/Solid
Netzgröße

Direkt gekoppelt mit Modellerstellung

**Auswertung
Filterung
Mittelwertbildung**

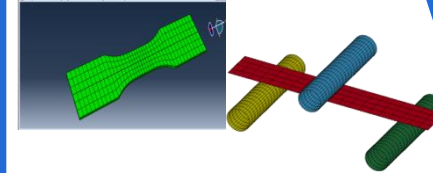
Automatisches LS-OPT Input-Deck

Direkt gekoppelt mit Solver run scripts

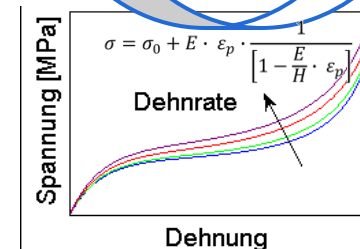
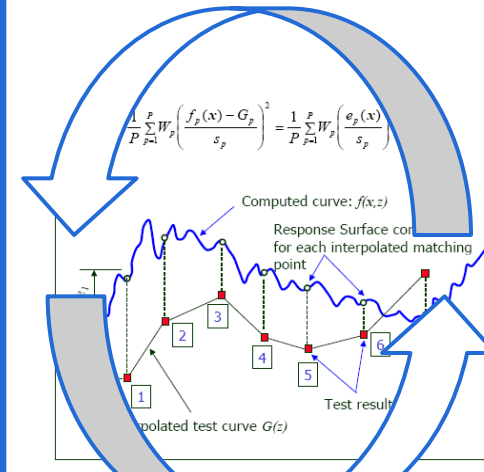
Optimierte Modelle mit parametrisierter Materialkarte

Automatische Netzerzeugung

FE-Modell vom Versuch

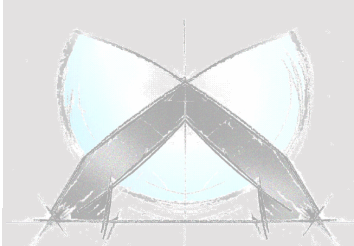


Reverse Engineering



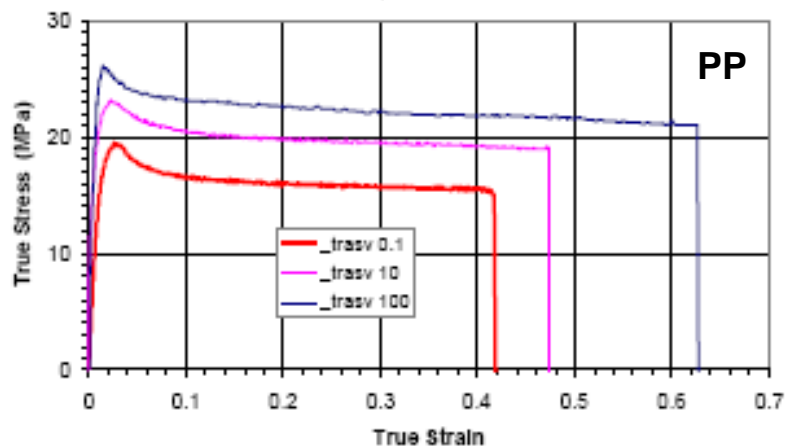
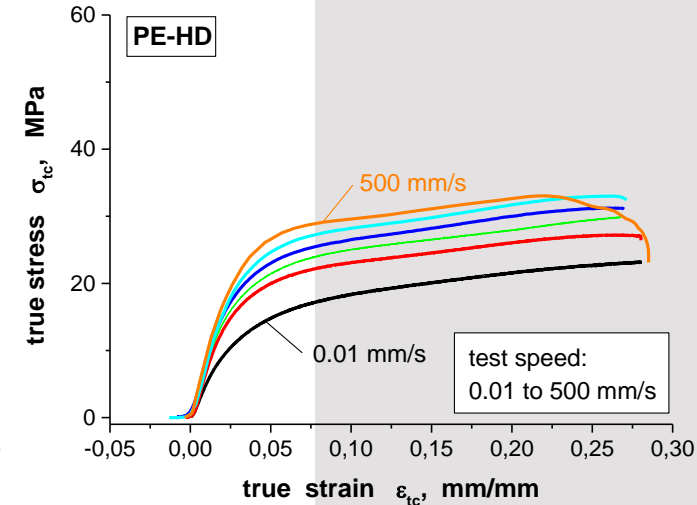
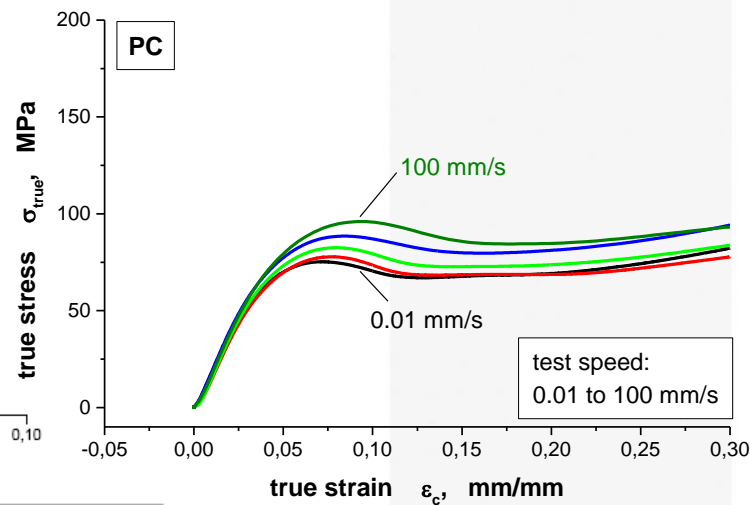
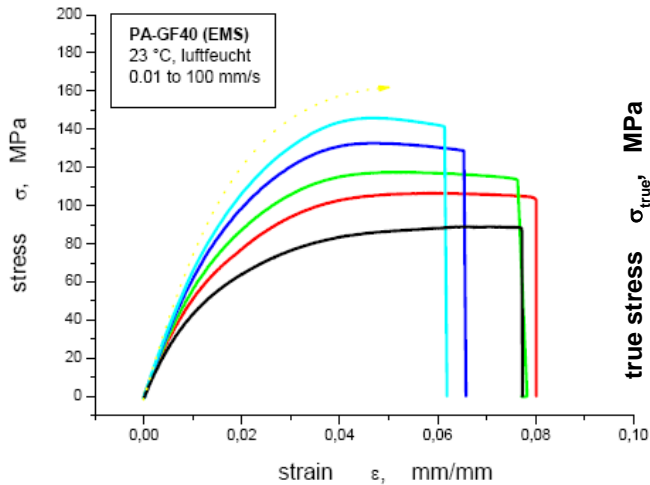
parametrisierte Materialkarte

**validierte
Material-
karte**



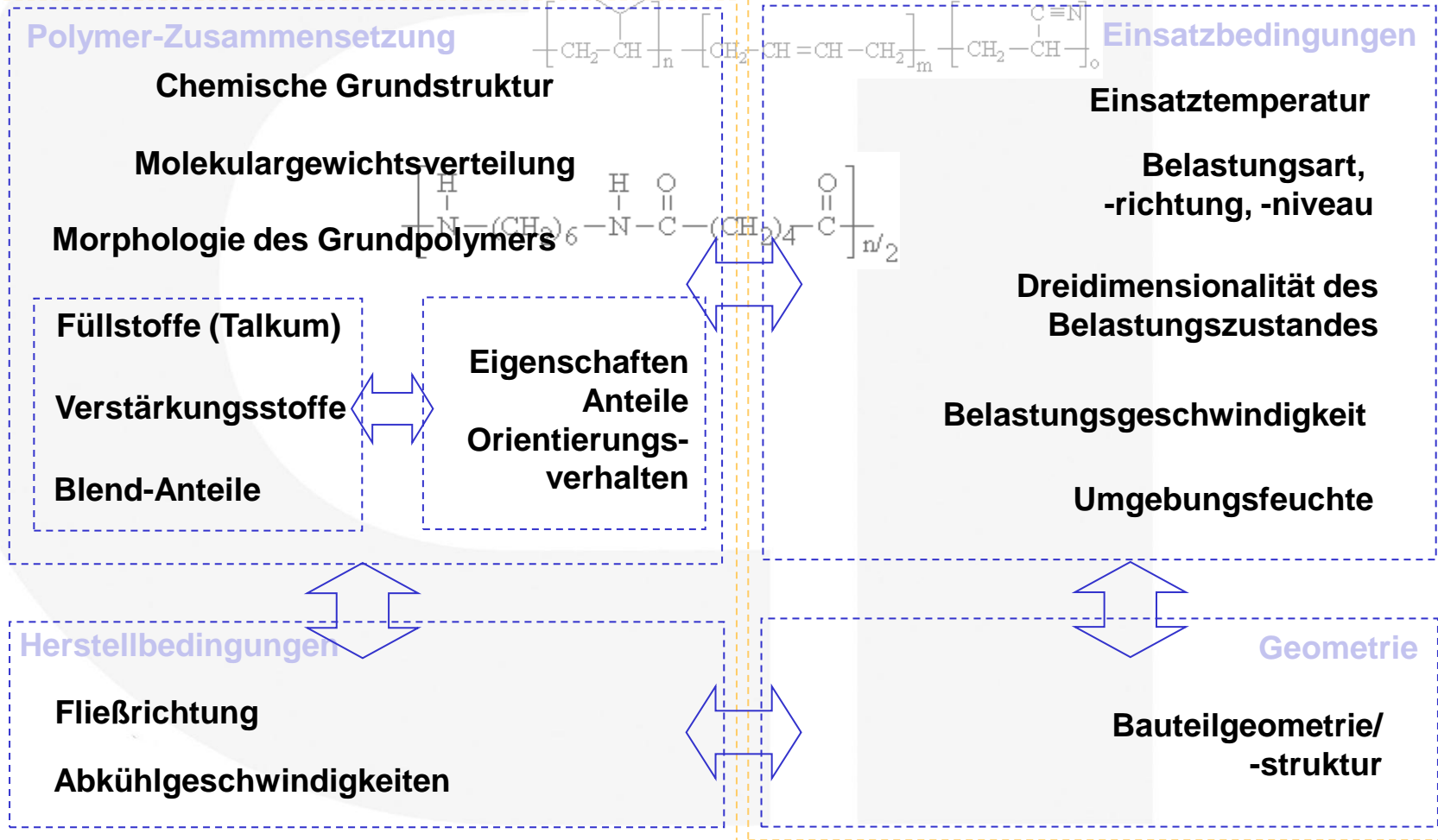
Je nach Material ist das dynamische Verhalten mehr oder weniger ausgeprägt.

Beispielhaft dargestellt für unterschiedliche Materialien [1], [2], [3]



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Material **Anwendung**



➤ Die wichtigsten Abhängigkeiten der Eigenschaften der Kunststoffe sind somit

- Temperatur
- Dehnrage (Belastungsgeschwindigkeit)
- Feuchte
- Orientierung (der Fasern)
- Belastungsart (Zug, Druck, Schub)

Priorität ist vom Material abhängig

➤ Aufgrund der Vielzahl an Einflüssen sind einerseits **einfache Materialmodelle** notwendig, die leicht handhabbar sind und schnelle Ergebnisse liefern (d.h. nicht alle Einflüsse können berücksichtigt werden) und andererseits **komplexe Materialmodelle**, die das Materialverhalten bestmöglich und allumfassend abbilden können.



➤ *PLASTIC: einfaches Materialmodell

- **von Mises** Fließfläche (Zylinder), **plastische Volumenskonstanz**
- Standard:
Dichte, E-Modul, Querkontraktionszahl und Fließkurven notwendig
→ schnelle Materialdatenermittlung durch Biege- oder Zugversuche
- Optional:
Temperaturabhängigkeit, Dehnratenabhängigkeit können berücksichtigt werden

hydrostatischer Druck

$$p = -\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}$$

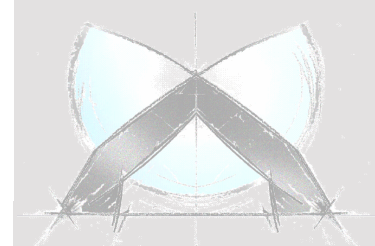
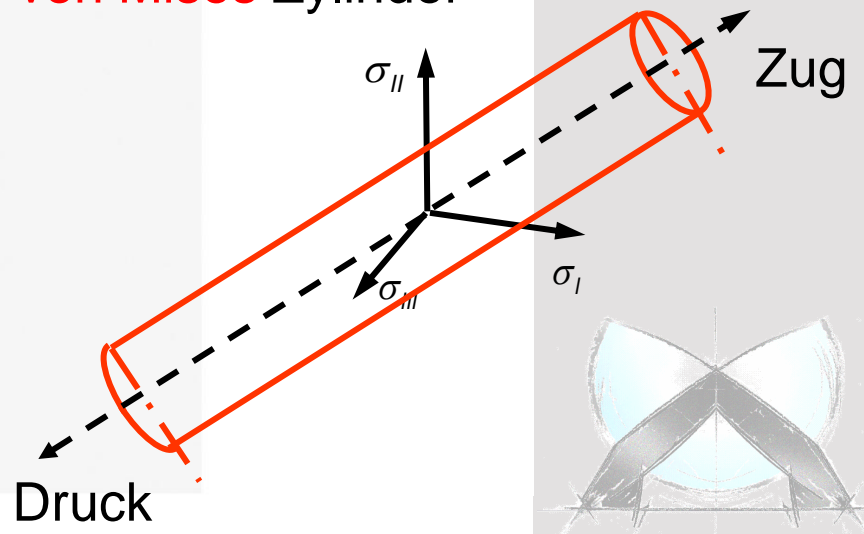
Vergleichs pannung

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \left((\sigma_{xx} + p)^2 + (\sigma_{yy} + p)^2 + (\sigma_{zz} + p)^2 + 2 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right)}$$

Mehrachsigkeit

$$\eta = -\frac{p}{\sigma_{VM}}$$

von Mises Zylinder



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

➤ *PLASTIC: typisches Input-Deck

***MATERIAL, SRATE FACTOR=0.9, STRAIN RATE REGULARIZATION=LOGARITHMIC, NAME=PlasticMaterial**

***DENSITY**
1.36E-09,

Dehnratenfilterung

Dehnraten Regularisierung
Option: LINEAR

***ELASTIC**
1267.2, 0.3

***PLASTIC, RATE=0, HARDENING= ISOTROPIC**

8.0,0
9.4,0.00143
10.7,0.0034
11.6,0.00563
12.3,0.00813
...

1. Dehnrade

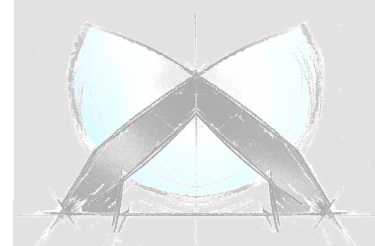
Weitere Optionen für die Verfestigung:
KINEMATIC, COMBINED, JOHNSON COOK, USER

Spannung, plastische Dehnung,
optional: Temperatur

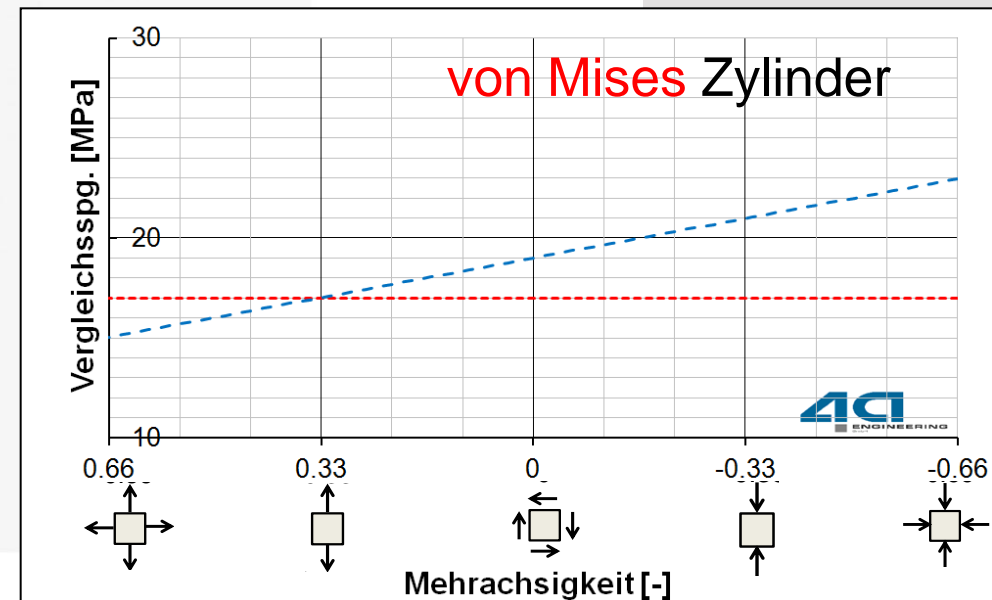
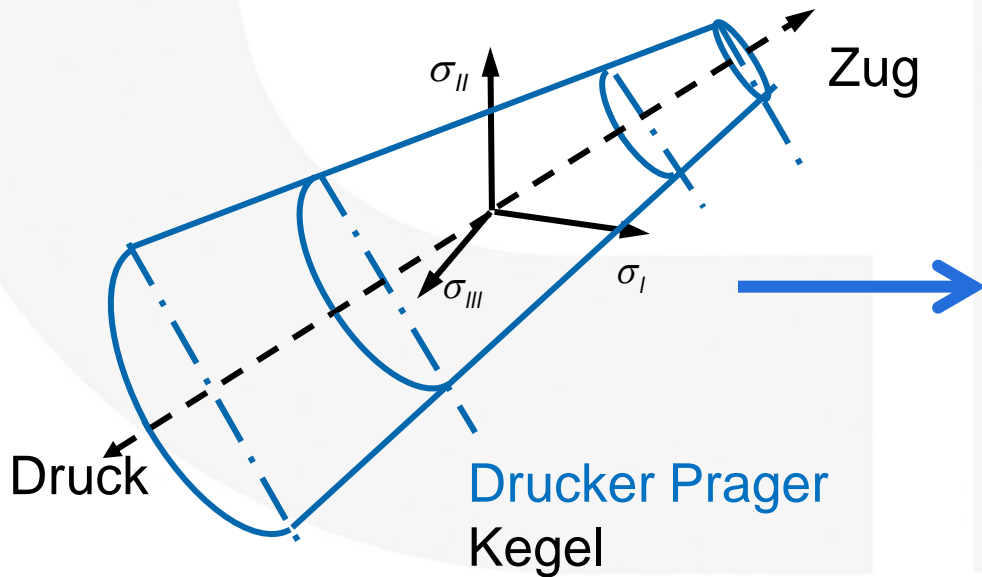
***PLASTIC, RATE=0.01**

9.2,0
10.9,0.00143
12.3,0.0034
13.4,0.00563
14.1,0.00813
...

2. Dehnrade



- ***DRUCKER PRAGER:** komplexeres Materialmodell
 - Fließfläche ist ein Kegel, **Zug-Druck-Abhängigkeit** wird berücksichtigt
 - für Materialdatenermittlung sind Biege- und Zug-/Druck-/gespannte Biegeversuche notwendig
 - Optional: Temperaturabhängigkeit, Dehnratenabhängigkeit können berücksichtigt werden



➤ *DRUCKER PRAGER: typisches Input-Deck

*MATERIAL, SRATE FACTOR=0.9, STRAIN RATE REGULARIZATION=LOGARITHMIC, NAME=PlasticMaterial

**

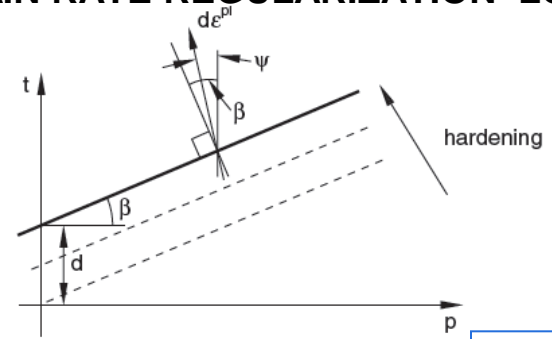
**

*DENSITY

1.36E-09,

*ELASTIC

1267.2, 0.3



*DRUCKER PRAGER, SHEAR CRITERION=LINEAR

beta, K (0.778<=K<=1), psi (Dilatationswinkel), optional: Temperatur,

*RATE DEPENDENT, TYPE=JOHNSON COOK

0.3, 0.001

*DRUCKER PRAGER HARDENING, TYPE=COMPRESSION

22.815, 0

23.531, 0.001

24.234, 0.002

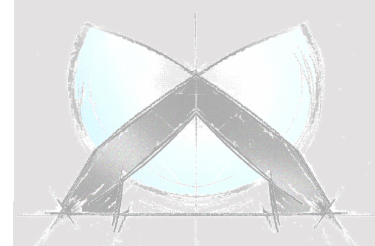
...

Fließregel

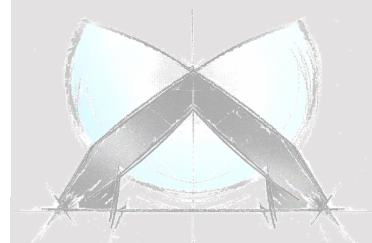
Dehnratenabhängigkeit
optional: POWER LAW (Cowper Symonds)

Verfestigung
optional: TENSION oder SHEAR

Parameter d wird aus der Fließkurve berechnet
K ist das Verhältnis der Fließspg. im dreiachsigen Zug zu Druck
psi>0: plastische Volumenzunahme



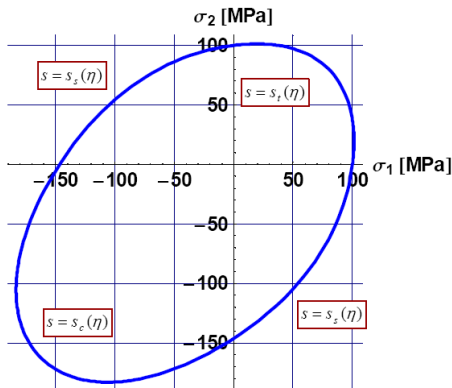
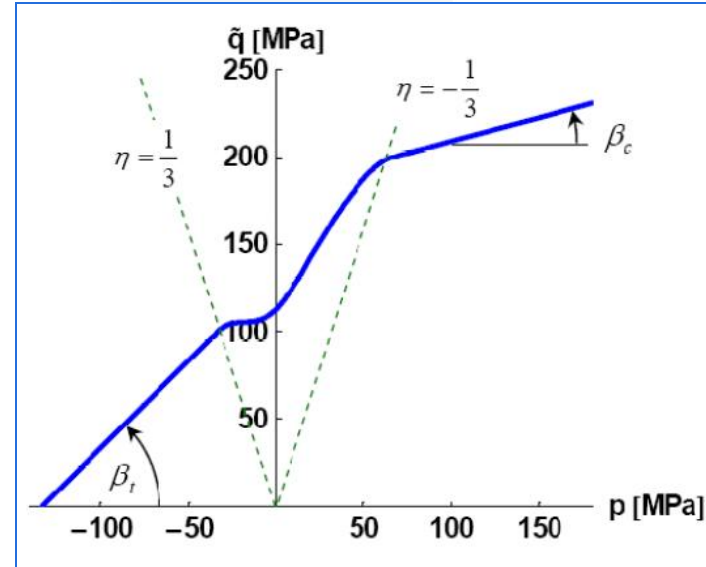
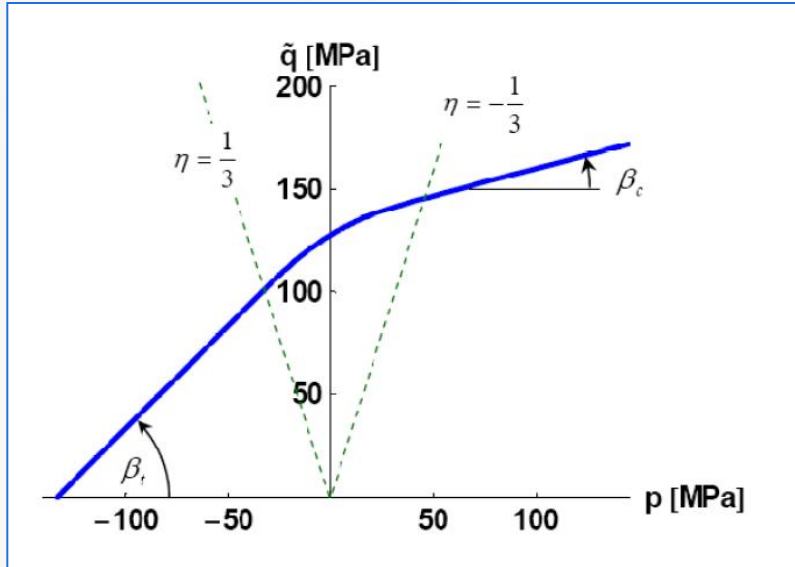
- Speziell für Kunststoffe wurde in Abaqus das Materialmodell **ABQ_MOLDED_PLASTIC** entwickelt. Aktuell ist es als „Nicht Standard“ Materialmodell sprich als VUMAT implementierbar [4]
- Die Fließkurven können für **Zug, Druck und Schub** angegeben werden, ebenso eine **Dehnratenabhängigkeit** (nach Johnson-Cook oder Cowper-Symonds) für diese Kurven
- Die Fließfläche besteht aus „2 Kegel“ (für Zug und für Druck) und eine Übergangsfläche im Schubbereich (konvex oder nicht-konvex)
- Damage Initiation und Evolution für Ductiles und Shear Kriterium sind direkt in der VUMAT implementiert.
Damit lässt sich Schädigung/Versagen abhängig von der Belastung (Mehrachsigkeit und Dehnrage) definieren.



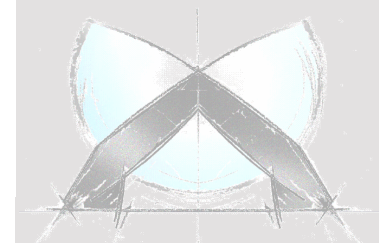
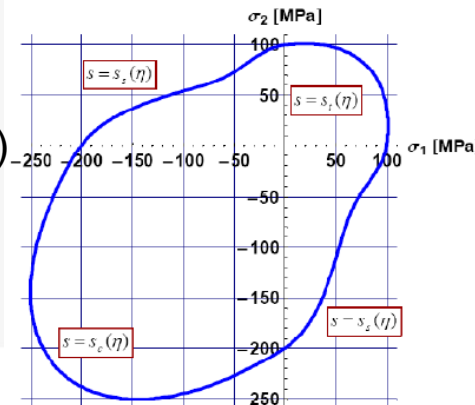
Thermoplaste

allgemeine Fließflächen: ABQ_MOLDED_PLASTIC

- Die Konvexität wird über 3 Kriterien bestimmt, im allgemeinen zeigen die Kunststoffe aber einen nicht-konvexen Übergangsbereich



Übergangsbereich :
 konvexer (links, z.B. PA) und
 nicht-konvexer (rechts, z.B. PE)



- Die plastische Deformation von Kunststoffen ist nicht volumenskonstant. Über den sog. Dilatationswinkel (beta) kann die plastische Querkontraktion festgelegt werden. Mit beta=0 ergibt sich isochores Fließen.

$$d\lambda\beta = (1 - 2\nu_{pl})d\lambda\left(1 + \frac{\beta}{3}\right)$$

$$\beta = (1 - 2\nu_{pl})\left(1 + \frac{\beta}{3}\right)$$

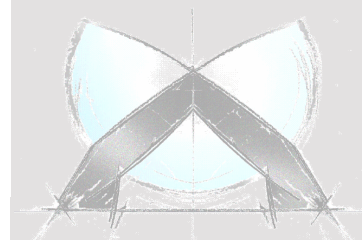
$$\beta = 1 - 2\nu_{pl} + \frac{\beta}{3} - \frac{2}{3}\nu_{pl}\beta$$

$$2\beta + 2\nu_{pl}\beta = 3 - 6\nu_{pl}$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{3}{2} \frac{1 - 2\nu_{pl}}{1 + \nu_{pl}} \quad \Leftrightarrow \quad \nu_{pl} = \frac{3 - 2\beta}{6 + 2\beta}$$

Quelle: [5]

ν_{pl}	β
0	85.9
0.05	73.7
0.1	62.5
0.15	52.3
0.2	43.0
0.25	34.4
0.3	26.4
0.35	19.1
0.4	12.3
0.45	5.9
0.5	0.0

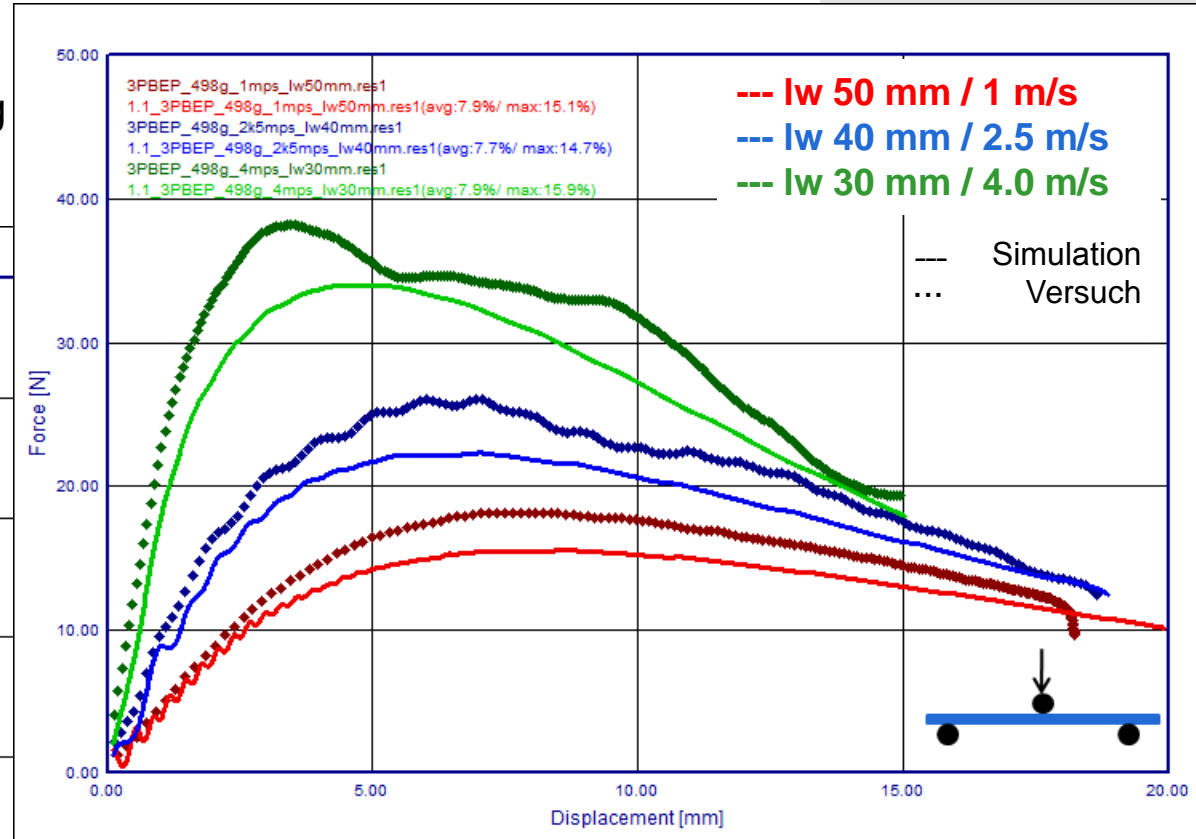
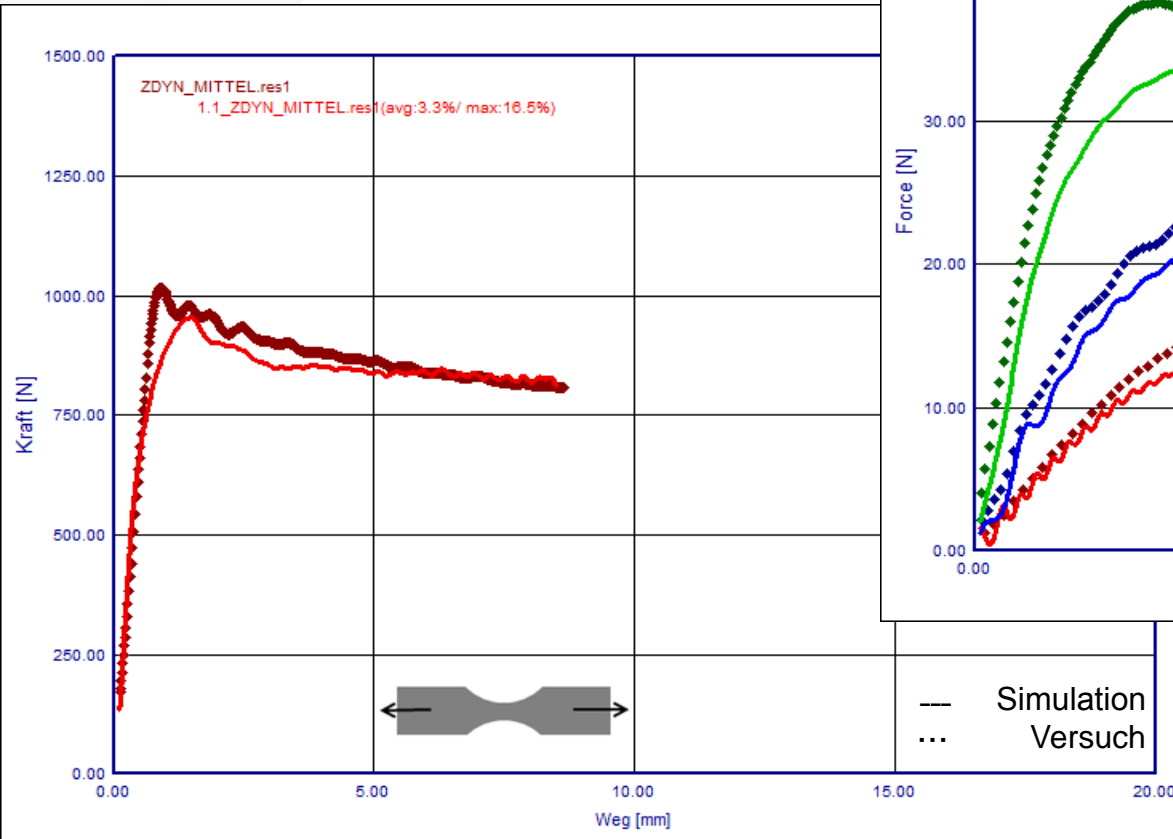


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

➤ Abaqus: *PLASTIC (von Mises), keine Zug-/Druck-Abhängigkeit

→ Gute Übereinstimmung für Zug

→ Schlechte Übereinstimmung für Biegung



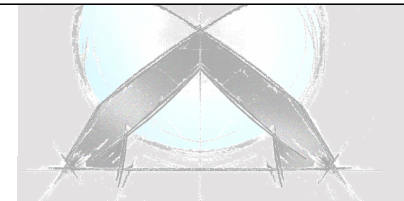
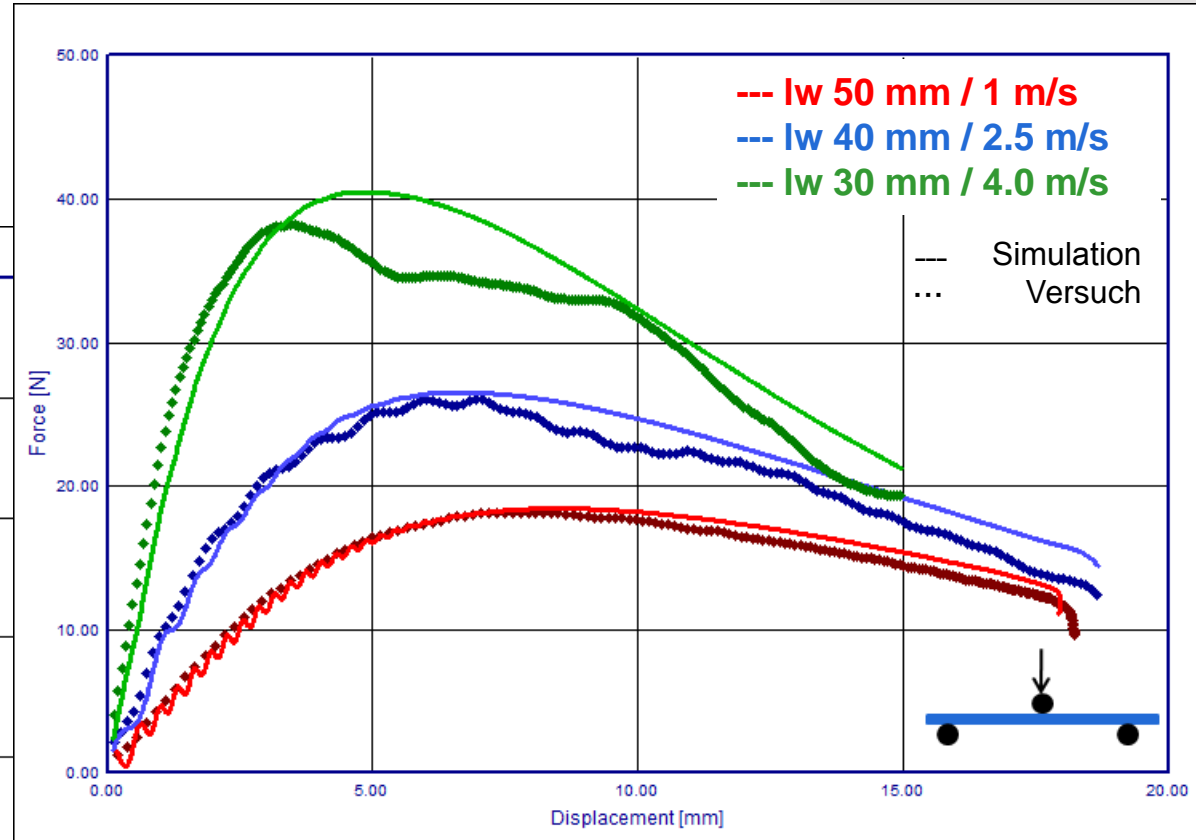
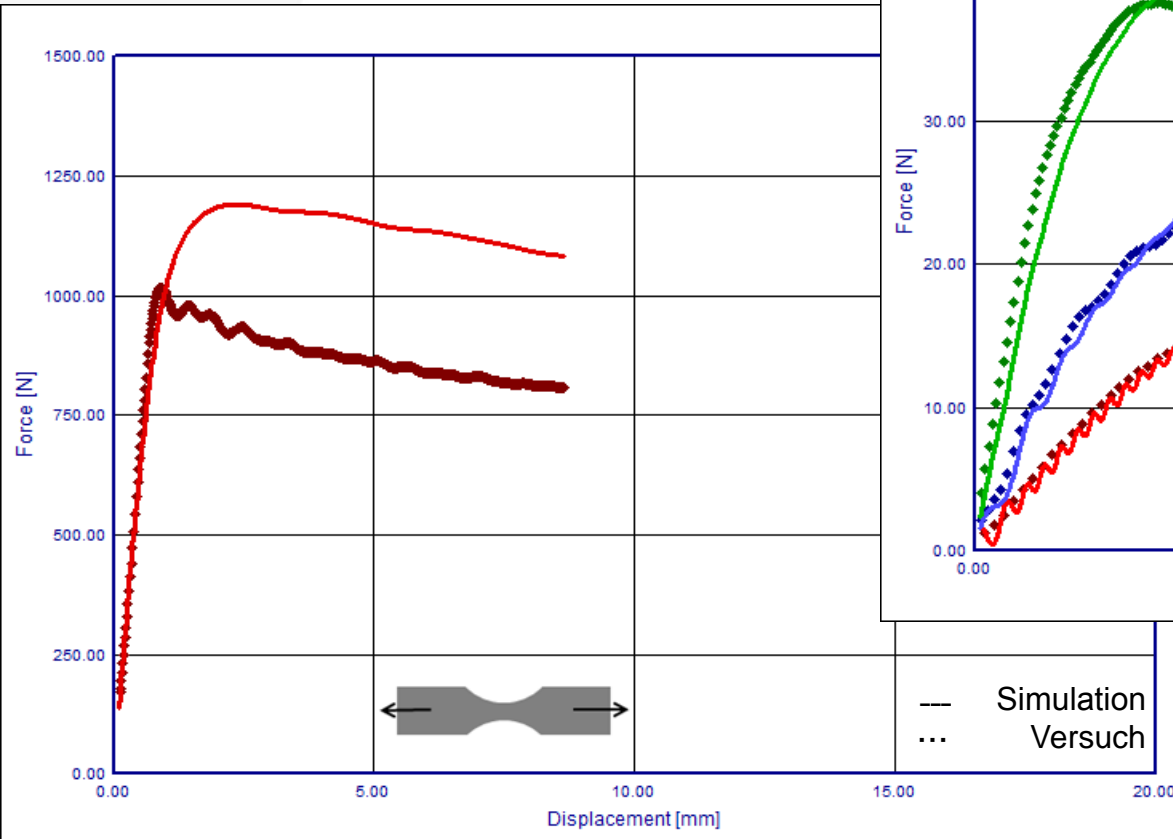
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Thermoplaste

von Mises Materialverhalten

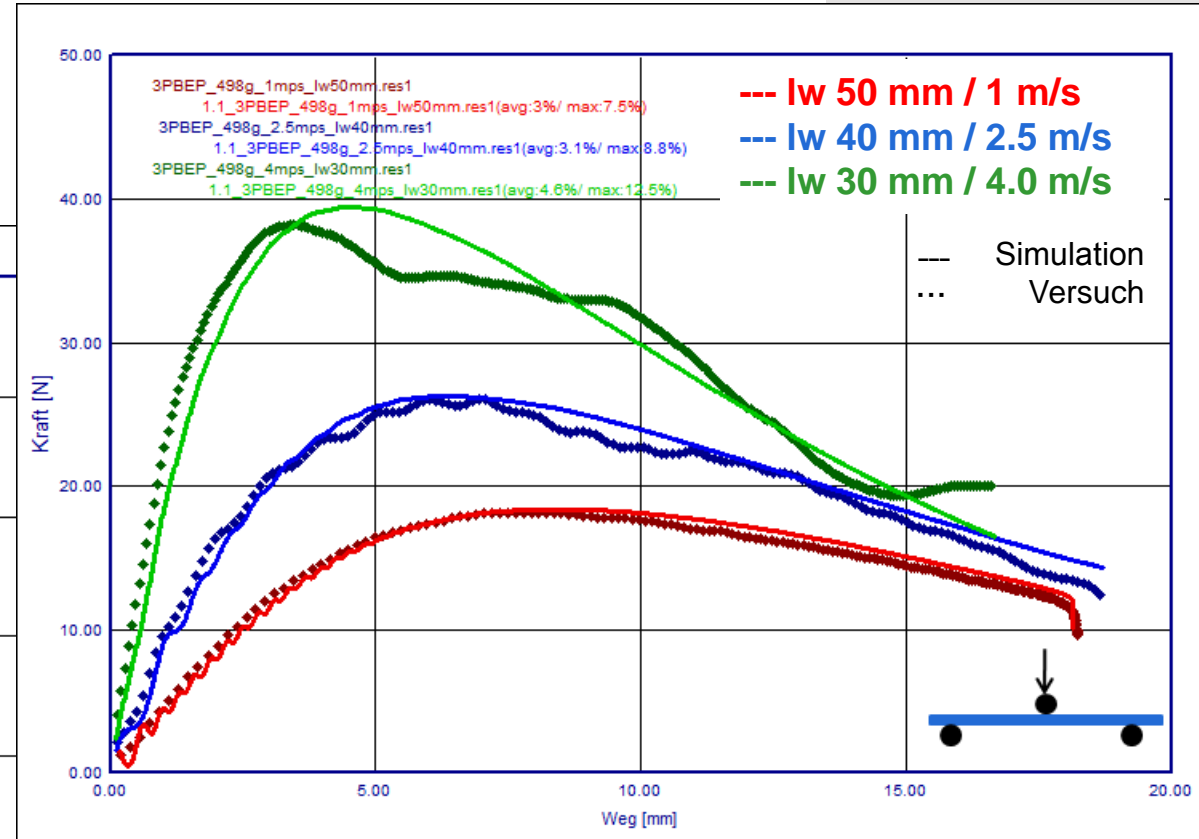
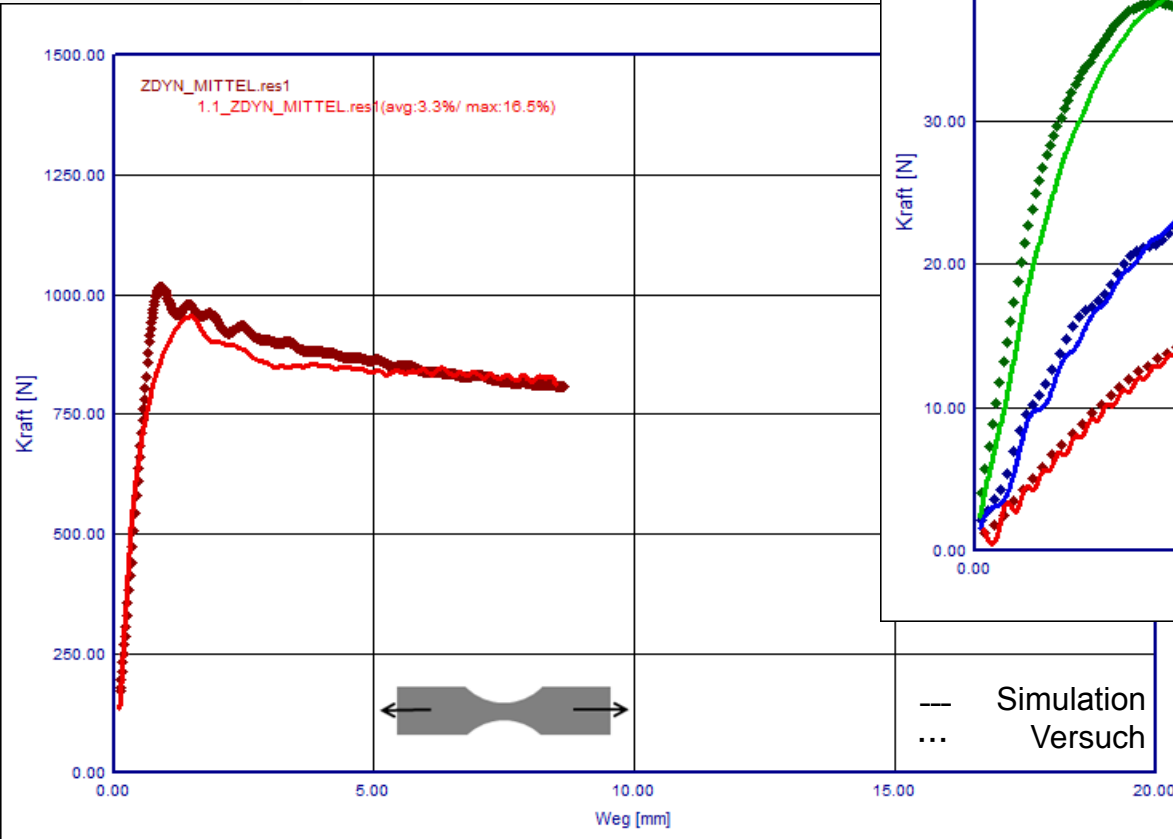
➤ Abaqus: *PLASTIC (von Mises), keine Zug-/Druck-Abhängigkeit

- Gute Übereinstimmung für Biegung
- Schlechte Übereinstimmung für Zug



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Abaqus: *ABQ_MOLDED_PLASTIC (allgemeine Fließfläche), Berücksichtigung Zug-/Druck-Abhängigkeit
- Gute Übereinstimmung für Biegung
- Gute Übereinstimmung für Zug



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

➤ Aktuell für ABAQUS implementiert

➤ *PLASTIC

➤ *DRUCKER PRAGER

➤ *ABQ_MOLDED_PLASTIC **

** Derzeit nur als benutzerdefinierte Materialkarte verfügbar

von Mises

Drucker Prager

Allg. Fließfläche

Material behaviour	
Material source	Implemented
Density	-1310.77238769531
Poisson's ratio	0.3
Failure strain	0
Elasticity	Linear elastic
Plasticity	vonMises
Curve 1	4a Model A
Strain rate dependency	Table
Strain range upto	0.2
Sampling points	50
Bias factor	10
Material card	6011_ELASTICPLASTIC

Material behaviour	
Material source	Implemented
Density	-1310.77238769531
Poisson's ratio	0.3
Failure strain	0
Elasticity	Linear elastic
Plasticity	Drucker-Prager
Curve 1	4a Model A
Curve 2	Kurve 1 skaliert
Strain rate dependency	Table
Strain range upto	0.2
Sampling points	50
Bias factor	10
Material card	6021_Drucker Prager

Material behaviour	
Material source	Implemented
Density	-1310.77238769531
Poisson's ratio	0.3
Failure strain	0
Elasticity	Linear elastic
Plasticity	general yield surface (3 curves)
Curve 1	4a Model A
Curve 2	Kurve 1 skaliert
Curve 3	Kurve 1 skaliert
Strain rate dependency	Table
Strain range upto	0.2
Sampling points	50
Bias factor	10
Material card	

➤ Alle ABAQUS Materialkarten über benutzerdefinierte Schnittstellen verfügbar

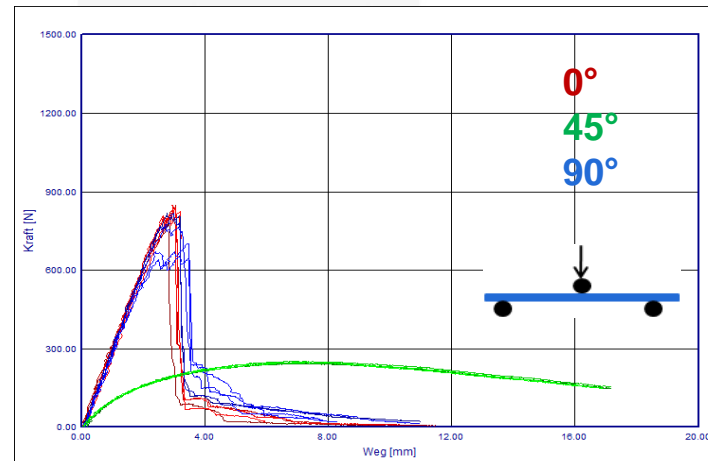
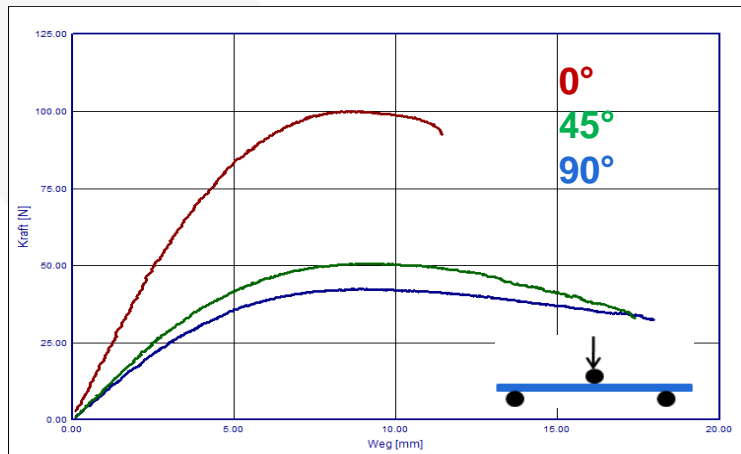
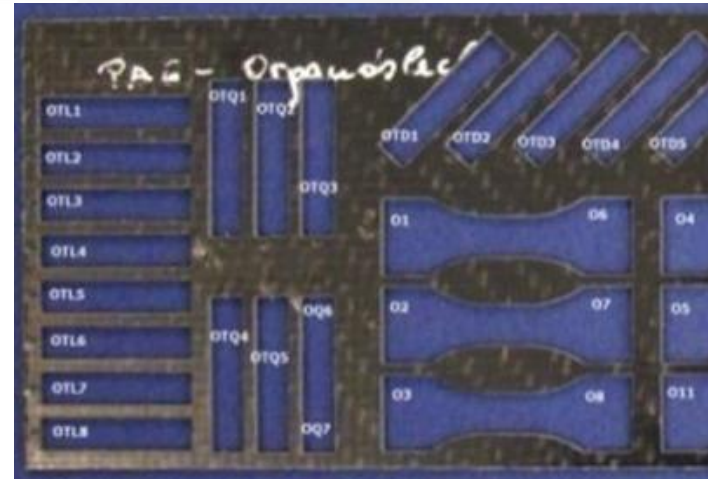
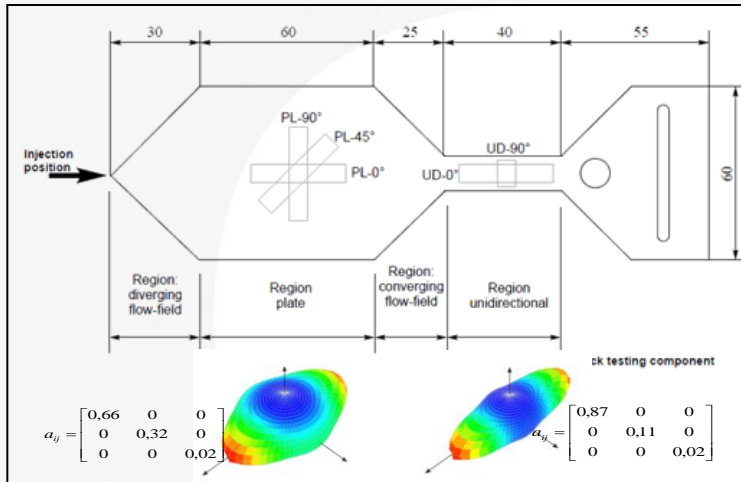
Materialmodelle für Composites



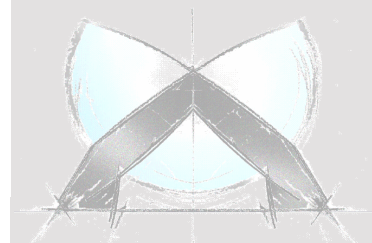
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste [6]

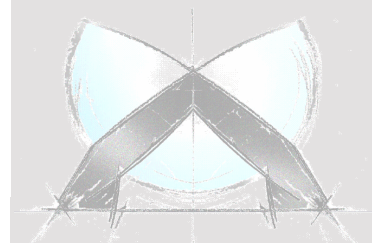
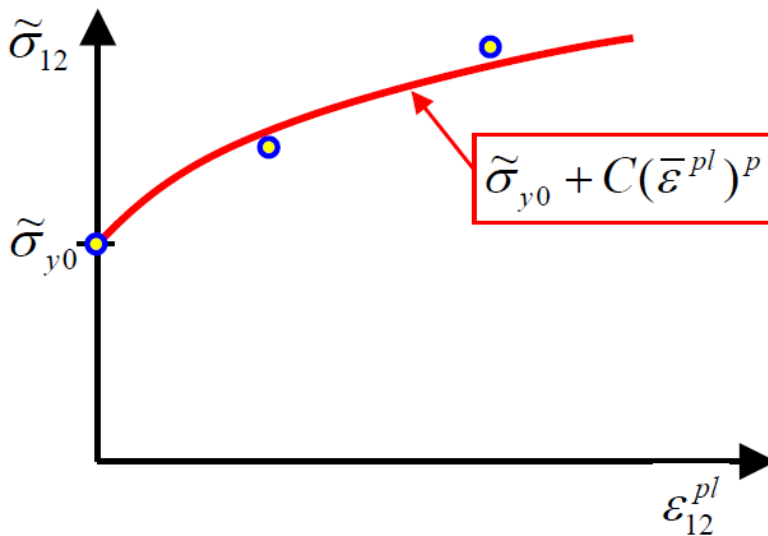
Composite – “Organoblech” [7]



- Abaqus bietet analog zu den Thermoplasten eine VUMAT ***ABQ_PLY_FABRIC** an. [8]
- Die wichtigsten Materialparameter sind
 - E-Moduli in 0° und 90° Richtung für Zug- und Druckbelastung
 - Schubmodul (45° Richtung)
 - Querkontraktionszahlen ν_{12} für Zug- und Druckbelastung
 - Festigkeiten in 0° und 90° Richtung für Zug- und Druckbelastung
 - Schubfestigkeit
- Zur Ermittlung dieser Kennwerte sind Biege- bzw. Zugmessungen in 0°, 45° und 90° Orientierung notwendig.
- Mithilfe der Mikromechanik (z.B. 4a micromec) können die elastischen Eigenschaften direkt berechnet / abgeschätzt werden.



- Im Materialmodell *ABQ_PLY_FABRIC können/müssen auch noch entsprechende Schädigungsparameter angegeben werden (z.B. Bruchenergien). → **Abstimmung Idealisierung**
- Wichtig für Gewebe ist, dass eine Materialdatenanpassung immer auf die 45° Richtung ausgerichtet ist (Einfluss der Materialkennwerte von 0° und 90° Orientierung). → **repräsentative Probenbreite !!!**



➤ * ABQ_PLY_FABRIC: typisches Input-Deck

```
*MATERIAL, NAME= ABQ_PLY_FABRIC
*DENSITY
  ρ
*USER MATERIAL, CONSTANTS=40
** Line 1:
  E1+, E2+, ν12+, G12, E1-, E2-, ν12-
** Line 2:
  X1+, X1-, X2+, X2-, S
** Line 3:
  Gf1+, Gf1-, Gf2+, Gf2-, α12, d12max
** Line 4:
  σ̃y0, C, p
** Line 5:
  lDelFlag, dmax, ε̄maxpl, ε̂max, ε̂min
*DEPVAR, DELETE=16
16
```

E-Modul in 0° (Zug), E-Modul in 90° (Zug),
Querkontraktionszahl ν₁₂ (Zug), Schubmodul,
E-Modul in 0° (Druck), E-Modul in 90° (Druck),
Querkontraktionszahl ν₁₂ (Druck),

Festigkeit in 0° (Zug), Festigkeit in 0° (Druck),
Festigkeit in 90° (Zug), Festigkeit in 90° (Druck),
Schubfestigkeit

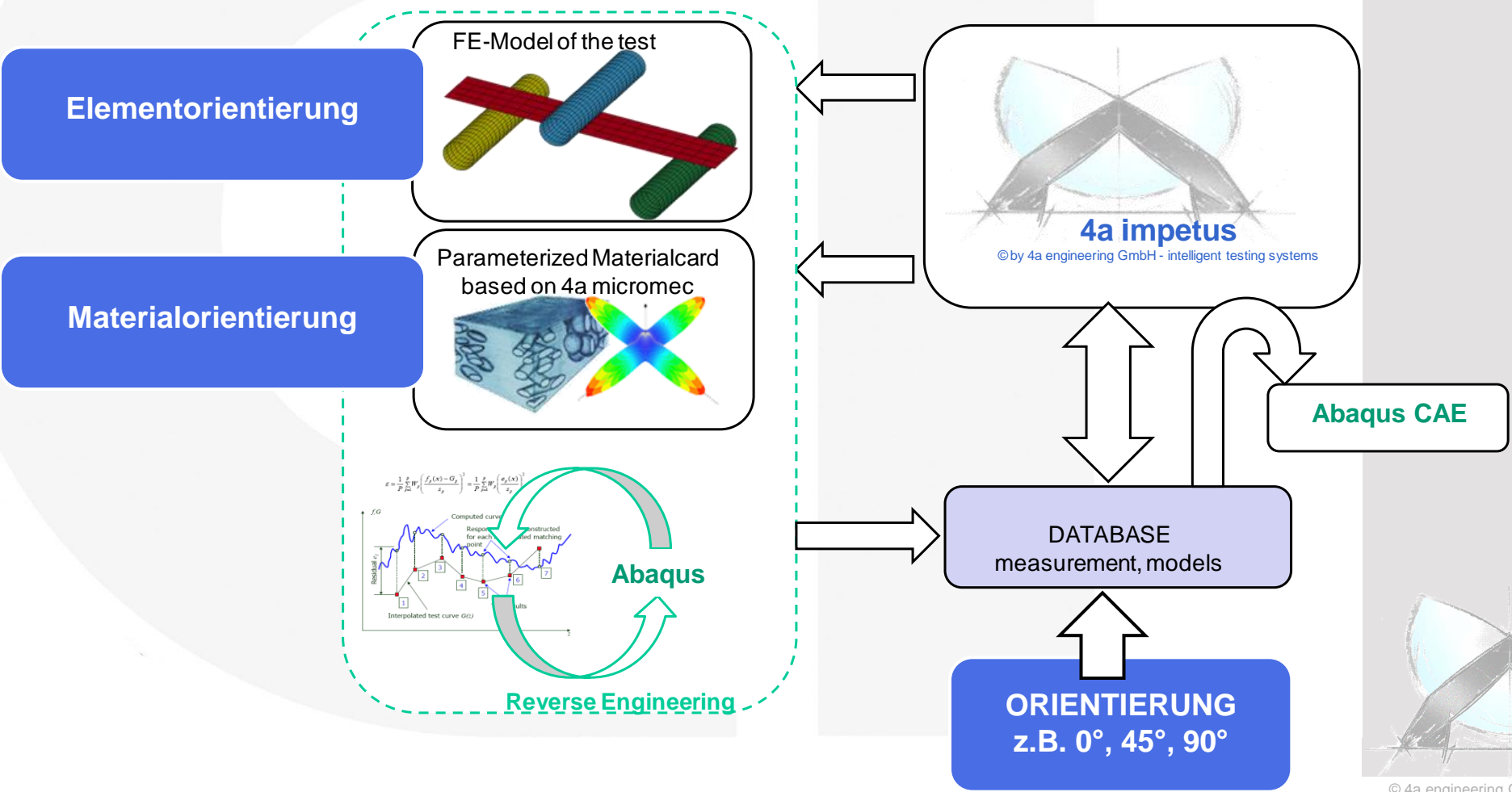
Schädigungsparameter

Schubverfestigungsdaten

Daten für Elementlöschung



- Für die Materialkartenerstellung muss die Mikromechanik eingebunden werden (Einfluss des Herstellungsprozesses → **Faserorientierung**)



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Input

Material Data of Components (E, α, λ)

Matrix
Reinforcements
Fillers

Data-Base



Fibre and Particle Orientation

Data-Base

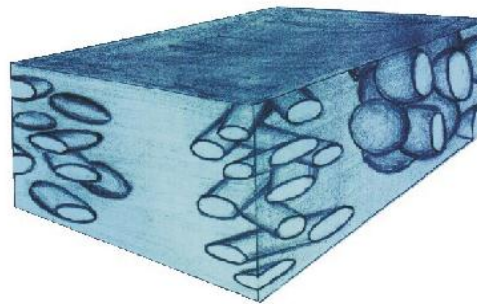


Fibre and Particle Shape

Data-Base



4a micromec

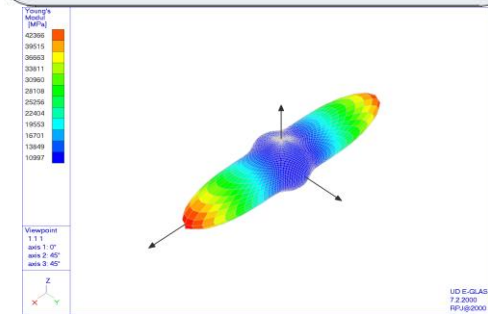


Virtual Material Design



Output

3D Composite Data



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

➤ Standard Materialkennwerte aus 4a micromec

Look up

- ALUMINIUM
- BETON
- BLEI
- CALCIUMCARBONAT
- E-GLAS
- EPDM
- EPOXID**
- EPOXID_2800
- EPOXID_3200
- EPOXID_3500

Data Record
 Number 7
 NAME EPOXID
 Comment
 TYPE

Select material type
 Isotropic
 Transversally Isotropic
 Orthotropic
 Anisotropic

Isotropic
Density
 ρ 1.2 g/cm³

Material Characteristics
 E 3500 MPa
 ν 0.35
 G 1296 MPa

Thermal Expansion
 α 55 E-6

Look up

- PEEK
- PES
- POLYAMID66
- PP
- QUARZSAND
- S-GLAS
- SBR
- STAHL
- T300**
- T400

Data Record
 Number 33
 NAME T300
 Comment Kohlenstofffaser High Tension
 TYPE

Select material type
 Isotropic
 Transversally Isotropic
 Orthotropic
 Anisotropic

Transversally Isotropic
Density
 ρ 1.76 g/cm³

in plane
 E₁ 218800 MPa
 ν_{12} 0.23
 G₁₂ 50000 MPa

normal (isotropic) plane
 E₂ 28000 MPa
 ν_{23} 0.39
 G₂₃ 10072 MPa

Thermal Expansion
 α_1 -0.35 E-6 α_2 12.5 E-6

➤ Berechnungseinstellungen

MICRO 3D

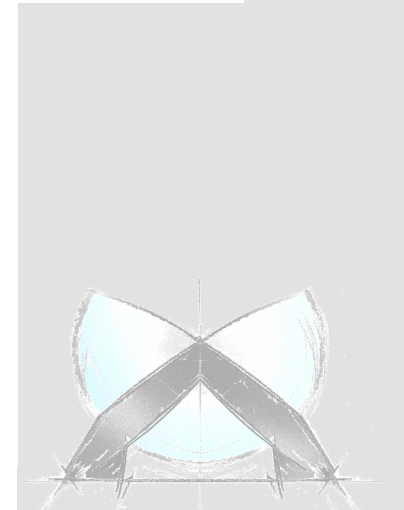
Calculation look up

MATRIX
 PARTS Material choice
 40 EPOXID_3500

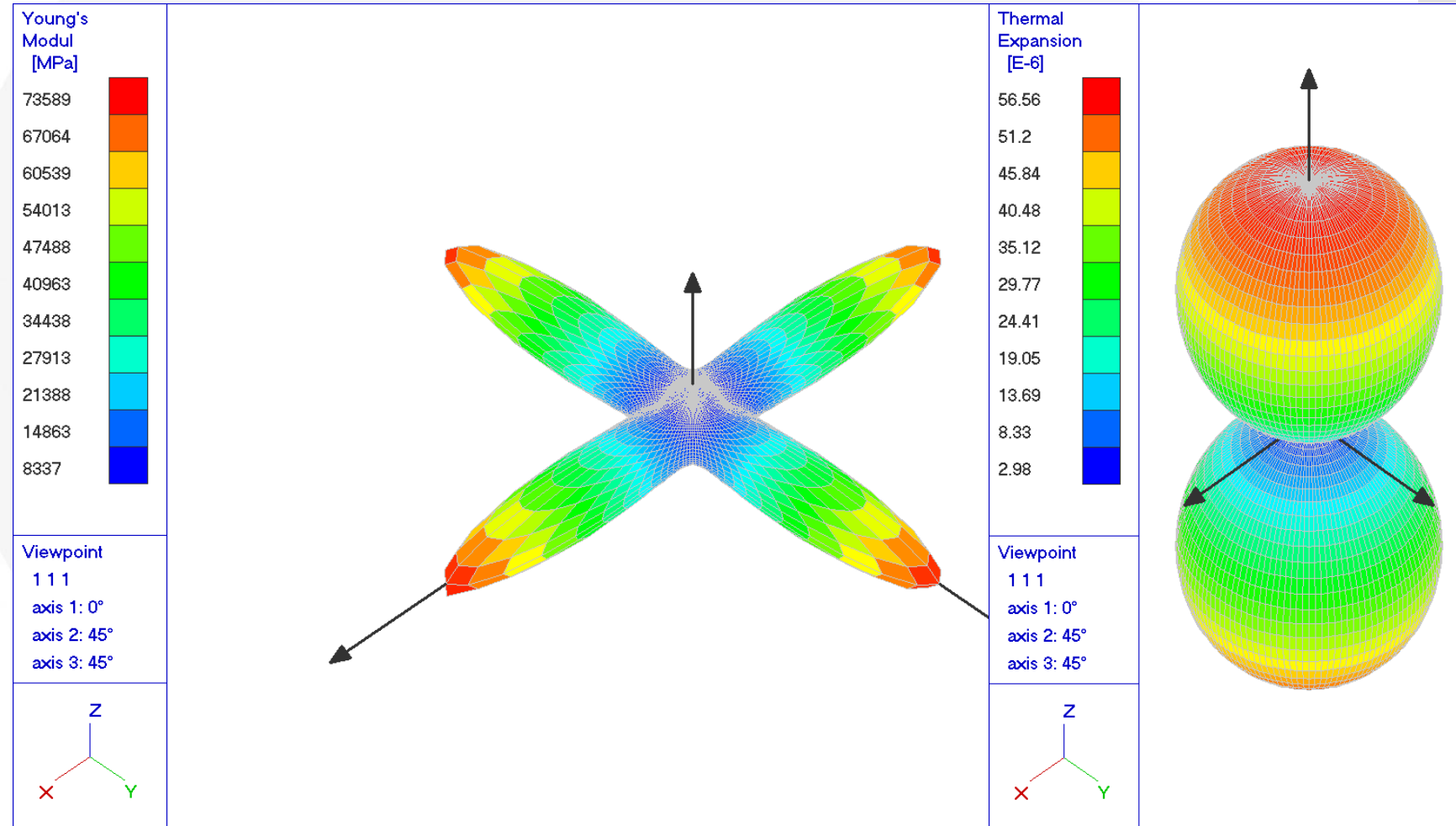
	PARTS	Material choice	Fiberorient. choice	Particle choice
⌘	60	T300	QU_0/90	LANGFASER
*				

Data Record
 NAME Gewebe
 Comment
 Parts in VOL% MASS% TYPE
 Start calculation
 Print the calculation
 Write to material database

◀ Add Delete Insert as New ▶▶▶ Close



➤ Ergebnis



- **Abaqus** bietet eine Vielzahl an Materialmodellen um das dynamische Materialverhalten von **Kunststoffen und Composites** sehr gut beschreiben zu können.
- Mit steigender Komplexität erhöht sich die Abbildungsgenauigkeit aber auch der Aufwand zum Kalibrieren von Materialmodellen. Daher ist es essentiell sich auf die wesentlichen Einflüsse zu fokussieren.
- Tools wie **4a impetus** oder auch **4a micromec** stellen Qualität und Reproduzierbarkeit im Prozess der Erstellung von Materialkarten sicher. Insbesondere da sich Materialkarten nicht von der gewählten Idealisierung (SOLVER, ELEMENTTYP und –GRÖSSE, ...) trennen lassen.
- Aufgrund der Tatsache, dass Kunststoffe zukünftig eine mechanisch tragendere Rolle einnehmen werden, stellt die Abbildung des Versagens die größte Herausforderung für die Zukunft dar.



.. in physics we trust



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

[1] Werkstoffprüfung der Kunststoffe

R. W. Lang, Vorlesungsbehef IWKP, 2002

[2] Characterization of Dynamic Behavior of Engineering Polymers

Z. Major, M. Reiter, 4a –VDI Technologietag 2008

[3] Material data for CAE simulation. The approach of Basell Polyolefins

M. Nutini, 4a –VDI Technologietag 2008

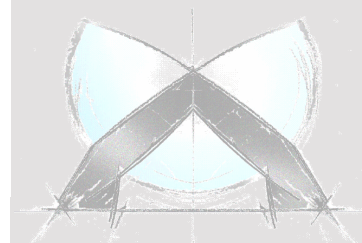
[4] VUMAT for Molded Plastics, Simulia - Dassault Systèmes,

<http://simulia.custhelp.com>

[5] Viskoplastische Stoffgesetze für Thermoplaste in LS-DYNA:

Theorie und Aspekte der Programmierung

Matthias Vogler, VDM Verlag Dr. Müller



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

[6] **4a micromec für die integrative Simulation faserverstärkter Kunststoffe**

A. Fertschej, B. Jilka, P. Reithofer (4a engineering GmbH)

11. LS-DYNA Forum 2012, Ulm

<http://www.dynamore.de/de/download/papers/ls-dyna-forum-2012/documents/materials-3-4>

[7] **Dynamische Materialcharakterisierung von Composites mit 4a impetus**

A. Dietrich, M. Fritz, B. Jilka, P. Reithofer (4a engineering GmbH)

B. Hofer, B. Fellner (MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG)

10. 4a Technologietag 2013, Schladming

http://technologietag.4a.co.at/images/tt2013/s5bv2_Reithofer.pdf

[8] **VUMAT for Fabric Reinforced Composites** , Simulia - Dassault Systèmes;

<http://simulia.custhelp.com>



© 4a engineering GmbH, all rights reserved